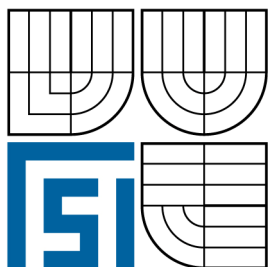


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# ANALÝZA MĚŘENÍ JÍZDNÍ DYNAMIKY VOZIDEL S VYUŽITÍM MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ

VEHICLE DYNAMICS MEASUREMENT ANALYSIS USING MATHEMATICAL MODELLING

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE  
PHD THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. ONDŘEJ BLAŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN CSc.

ŠKOLITEL SPECIALISTA Dr. Ing. PETR PORTEŠ

Oponenti: doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.  
doc. Ing. Robert Kledus, PhD.

Datum obhajoby:

**Klíčová slova:**

odhad stavových veličin, jízdní manévr, experimentální vozidlo, měřicí systém, diskretní Kalmanův filtr

**Key words:**

state variables estimation, driving manoeuvre, experimental car, measurement system, discrete Kalman filter

**Místo uložení práce**

Knihovna FSI VUT v Brně

# OBSAH

OBSAH .....	3
1 ÚVOD .....	4
1.1 Cíle práce .....	5
2 TEORIE DYNAMIKY VOZIDEL .....	7
2.1 Směrová tuhost pneumatiky .....	7
2.2 Jednostopý rovinný dynamický model vozidla .....	7
3 DYNAMICKÁ FILTRACE .....	8
3.1 Diskrétní Kalmanův filtr .....	8
4 JÍZDNÍ MANÉVR .....	9
5 EXPERIMENTÁLNÍ VOZIDLO .....	10
5.1 Měření hmotnostních parametrů experimentálního vozidla .....	10
6 MĚŘICÍ SYSTÉM .....	10
6.1 Hardwarová část .....	10
6.2 Softwarová část .....	12
7 MĚŘENÍ .....	13
8 PROPOJENÍ MĚŘENÍ S MATEMATICKÝM MODELEM .....	13
8.1 Vstupy Kalmanova filtru .....	14
8.1.1 Převod souřadnic GPS .....	14
8.1.2 Šum měření .....	14
8.1.3 Směrová tuhost pneumatik .....	14
8.2 Propojení měření s matematickým modelováním .....	14
8.2.1 Varianta 1 .....	14
8.2.2 Varianta 2 .....	16
8.2.3 Varianta 3 .....	17
8.3 Analýza vlivu směrové tuhosti pneumatik .....	20
9 DOPORUČENÍ DALŠÍHO POSTUPU .....	22
ZÁVĚR .....	23
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	24
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	26
ŽIVOTOPIS .....	27
ABSTRACT .....	29

# 1 ÚVOD

Analýza jízdního manévru plní nezastupitelnou úlohu při vývoji automobilů, pneumatik, při vyhodnocování dopravních nehod a v celé řadě dalších případů. Pro vyhodnocení jízdního manévru je možné použít dva základní přístupy. Jedním z nich je prosté měření dynamických veličin, na jejichž základě bude provedený jízdní manévr analyzován. Druhým přístupem je simulace jízdního manévru na počítači. U obou metod jsou však jistá úskalí, která mohou vést k chybným závěrům, při rozboru tohoto manévru. V případě prvním (měření dynamických veličin) je ono nebezpečí způsobeno tím, že jsou analyzovány jen relativně snadněji měřitelné veličiny (není možné předpokládat, že všechny potřebné veličiny lze měřit, popř. ze svého fyzikálního principu je jejich měření nesnadné), a to ještě zatížené chybou měření. V některých případech může navíc docházet k výpadkům měřeného signálu v průběhu prováděného manévru, čímž jsou data pro pozdější analýzu znehodnocena.

Druhým z přístupů je simulace jízdního manévru na počítači. V tomto případě je sestaven matematický model příslušného vozidla, který je buzen předem vytvořenými matematickými funkcemi (jako např. skokové natočení volantu apod.). Pro tento postup analýzy jízdního manévru již byly také vytvořeny některé komerční simulační programy. I tento přístup má však některé nedostatky, které následně mohou způsobit, že chování modelového systému reprezentující příslušné vozidlo se může značně lišit od chování skutečného vozidla při stejném manévru. Problém je především v tom, že model je vždy proti skutečnému vozidlu v mnoha ohledech zjednodušen. V případě, že se snažíme o co nejvýstižnější model, je zase třeba zjistit (změřit) celou řadu parametrů tohoto modelu, čímž do jisté míry ztrácíme výhodu simulace manévru na počítači s využitím matematického modelu proti měření dynamických veličin na vozidle pomocí snímačů. Navíc je skutečný jízdní manévr silně ovlivňován ze strany řidiče a také podmínkami, za nichž byl uskutečněn.

Výše zmíněné nedostatky by mohlo odstranit propojení obou přístupů, tedy spojení měření s matematickým modelem následujícím způsobem. Na vozidle jsou snímány jen relativně snadněji měřitelné veličiny, které zároveň tvoří vstupy matematického modelu. Na základě rozboru s takto definovaným modelem by bylo možné získat přesnější (úplnější) obraz o dynamických dějích probíhajících na vozidle (zrekonstruovat skutečně provedený manévr), než kdyby oba přístupy byly použity odděleně.

Celý uvedený systém je možné ještě rozšířit a zároveň i vylepšit využitím principů dynamické filtrace, kdy měřené veličiny slouží nejen jako vstupní veličiny matematického modelu, ale zároveň jsou tyto měřené veličiny používány pro korekci pohybu modelu.

V posledních letech se pozornost výrobců automobilů zaměřila na vývoj tzv. Driver Assistance Systems s cílem snížit námahu řidiče a zmírnit případné jeho chyby. Může jít např. o systémy udržující podélnou kontrolu vozidla (ovládající plyn a brzdu), systémy pro dodržování jízdy v jízdním pruhu, ABS (Anti-lock Brake System) zamezující blokování kol nebo ESP (Electronic Stability Program) omezující výskyt skluzů kol, smyku vozidla nebo dokonce jeho převrácení. Tyto aplikace využívají ve svých algoritmech vzhledem k výše zmiňovaným skutečnostem právě dynamických filtrů (často např. Kalmanových filtrů). Celá tato oblast je však značně složitá a v tuto chvíli je řešena právě především v oblasti vědy a výzkumu. Dalším důležitým úkolem souvisejícím s principy dynamické filtrace může být odhad parametrů modelu vozidla. Může jít např. o směrovou tuhost pneumatiky, klopnou tuhost náprav a dalších důležitých parametrů, které figurují v rovnicích dynamických modelů, a není vždy jednoduché přímo zjistit jejich hodnotu. Se znalostí těchto veličin může být dynamický model značně zpřesněn.

Automobily jsou v dnešní moderní společnosti opravdu nepostradatelným prvkem našich každodenních životů. Velice důležitou vlastností vozidla je jeho aktivní bezpečnost. Velký rozvoj se dá očekávat právě v oblasti elektronické podpory řidiče. V průběhu zatáčení vozidla

tento stabilizační prvek srovnává řidičem zamýšlené chování vozidla s jeho reálným chováním. Jestliže tento systém rozpozná rozdíl mezi těmito dvěma stavy, může zasáhnout, např. přibrzděním některého z kol, aby dodržel směr, kterým měl v úmyslu řidič se pohybovat. Odhad chování vozidla, které zamýšlí řidič je počítáno z úhlu natočení volantu a rychlosti vozidla (použití snímače úhlu natočení volantu a otáček kola). Pro určení skutečného chování vozidla je použit snímač stáčivé rychlosti kolem svislé osy a snímač příčného zrychlení. Tyto snímače však nemusí stačit pro správné určení stavu vozidla především v případech, kdy je vozidlo ve smyku. V těchto případech je nutné znát navíc úhel směrové úchylky vozidla. Vybavit však dnešní vozidla systémy schopnými měřit tento úhel směrové úchylky je prakticky nemožné především kvůli ceně, ale také samotnému principu měření. Právě proto je třeba získat hodnotu úhlu směrové úchylky náhradním způsobem. Často používaným způsobem je odhadnout tuto hodnotu na základě snímače stáčivé rychlosti a příčného zrychlení. Bohužel však signály z těchto snímačů jsou zatíženy šumem měření, objevuje se u nich teplotní drift, problémy vznikají při samotné integraci. Dalším problémem je část gravitačního zrychlení, která se promítá do osy akcelerometru vlivem klopení karoserie vozidla. Tyto problémy do jisté míry limitují efektivnější práci těchto elektronických stabilizačních prvků vozidla. Právě zlepšení možnosti odhadu úhlu směrové úchylky může výrazně přispět k lepší funkci těchto elektronických asistenčních programů. Právě v této oblasti lze spatřovat nejširší oblast použití odhadu stavů s využitím dynamických filtrů. Pokud budeme navíc schopni identifikovat parametry různých vozidel (znovu aplikací např. diskretního Kalmanova filtru) jako směrovou tuhost pneumatiky, faktor stability, klopnou tuhost atd., můžeme zefektivnit fungování např. elektronických stabilizačních systémů bránících převrácení vozidla, automatická jízda v pruhu atd. Zmapovat možnosti Kalmanova filtru právě ve výše zmíněných oblastech je hlavním cílem této dizertační práce.

## 1.1 Cíle práce

Disertační práce je orientovaná především na propojení měření s matematickým modelem využitím principů dynamické filtrace, čímž je možné přesně zrekonstruovat chování vozidla během prováděného jízdního manévru. V této kapitole budou stanoveny jednotlivé dílčí cíle, které je třeba splnit, aby bylo možné opravdu efektivně využít Kalmanových filtrů jak pro analýzu jízdního manévru vozidla, ale také v řídicích algoritmech elektronických asistenčních systémů vozidla. Cíle práce mimo jiné vychází i ze závěrů diplomové práce [11].

1. Jedním ze základních cílů této práce je navrhnout a realizovat dostatečně výkonný měřicí systém, který poskytne v dostatečné kvalitě potřebná vstupní data matematických modelů (tyto měřené veličiny je následně možné použít i pro korekci pohybu modelu). Tento měřicí systém bude sestaven na základě jednotky CompactRIO od firmy National Instruments. Tohle zařízení dává dostatečné možnosti pro připojení dostatečného množství vstupů (jejich případnou rozšiřitelnost) pro současné měření téměř všech relevantních veličin popisujících chování vozidla v průběhu manévru. Zároveň systém umožňuje měření vysokých vzorkovacích frekvencí některých signálů (nastavení správných vzorkovacích frekvencí je samostatným dosti složitým úkolem). Zvláštním problémem je synchronizace signálů z jednotlivých snímačů. Realizaci výkonného měřicího systému je opravdu základním stavebním kamenem této práce.

Optické scannery, které jsou dostupné na ÚADI dávají v souvislosti s měřicím systémem velké možnosti pro přesné určení polohy některých snímačů v základním souřadném vozidla. Znalost této polohy je klíčová především pro optické snímače rychlosti Correvit, snímače zrychlení, laserové snímače výšky (s ohledem na následnou korekci signálů z akcelerometrů) a systém GPS.

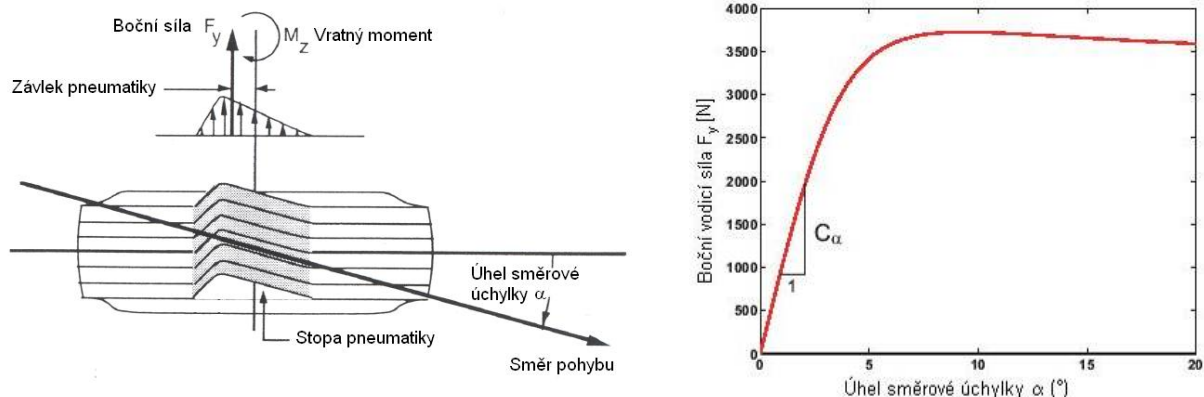
2. Dalším z cílů práce je volba vhodného matematického modelu, na jehož základě je možné s dostatečnou přesností zrekonstruovat skutečně provedený manévr automobilu. Cílem

tedy je sestavit rovnice popisující chování modelového systému, jež nahrazuje skutečný vozidlový systém. V první fázi je využíváno jednostopého rovinného dynamického modelu vozidla. Následně budou naznačeny možnosti i dalších složitějších modelů vozidla včetně měření některých jejich důležitých parametrů (např. měření kinematiky zavěšení s použitím optických scannerů). Rovnice příslušného matematického modelu včetně později sestaveného algoritmu Kalmanova filtru pro jednotlivé vybrané případy korekce jeho pohybu budou sestaveny v programovém prostředí Matlab.

3. Důležitým cílem, který si pro splnění klade tato práce je vytvoření metodiky měření významných veličin figurujících v rovnicích modelu. Jedná se o měření polohy těžiště vozidla, ale především o měření momentu setrvačnosti vozidla vzhledem k (svislé) ose  $z$ . Této záležitosti jsou věnovány některé další kapitoly této práce.
4. Posledním z cílů této práce je samotné propojení měření s matematickým modelem. Bude provedeno reálné měření s experimentálním vozidlem ÚADI s dvojím upořádáním zkušební dráhy (ISO/WD 3888/2). Budou prověřeny možnosti jednostopého dynamického modelu vozidla. Odhady stavu jako výstup diskrétního Kalmanova filtru budou realizovány v několika variantách podle různých měřených veličin použitých pro korekci pohybu modelu. Zároveň bude snahou v závěru práce naznačit další úkoly k řešení v oblasti využití dynamických filtrů v dynamice vozidel (především elektronických asistenčních prvků aktivní bezpečnosti) jako např. identifikace parametrů pneumatik a jiných parametrů vozidlového systému, využití podrobnějších dynamických modelů vozidla, využití rozšířeného Kalmanova filtru nebo jiných typů matematických filtrů.

## 2 TEORIE DYNAMIKY VOZIDEL

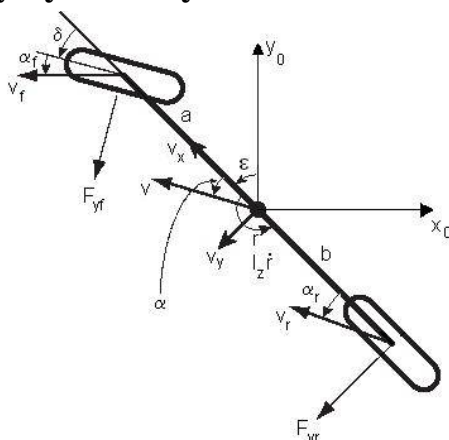
### 2.1 Směrová tuhost pneumatiky



Obr. 2.1 Směrová tuhost pneumatiky (vlevo), závislost boční vodící síly na úhlu směrové úchyly pneumatiky (vpravo)

Úhel mezi vektorem rychlosti pohybu kola a podélnou osou kola se nazývá úhel směrové úchyly (viz. Obr. 2.1). Z Obr. 2.1 je vidět, že závislost boční síly na úhlu směrové úchyly je nelineární. Pro menší úhly směrových úchylek (do 3 – 4 stupňů) je však možné tuto závislost považovat za lineární. Boční vodící síla je potom vyjádřena takto:  $F_y = -C_\alpha \cdot \alpha$

### 2.2 Jednostopý rovinný dynamický model vozidla



Obr. 2.2 Jednostopý rovinný dynamický model vozidla

V této práci byl pro vyšetřování jízdní dynamiky vozidla jednostopý rovinný dynamický model vozidla (viz. Obr. 2.3). Rovnice vyjadřující pohyb jednostopého rovinného modelu:

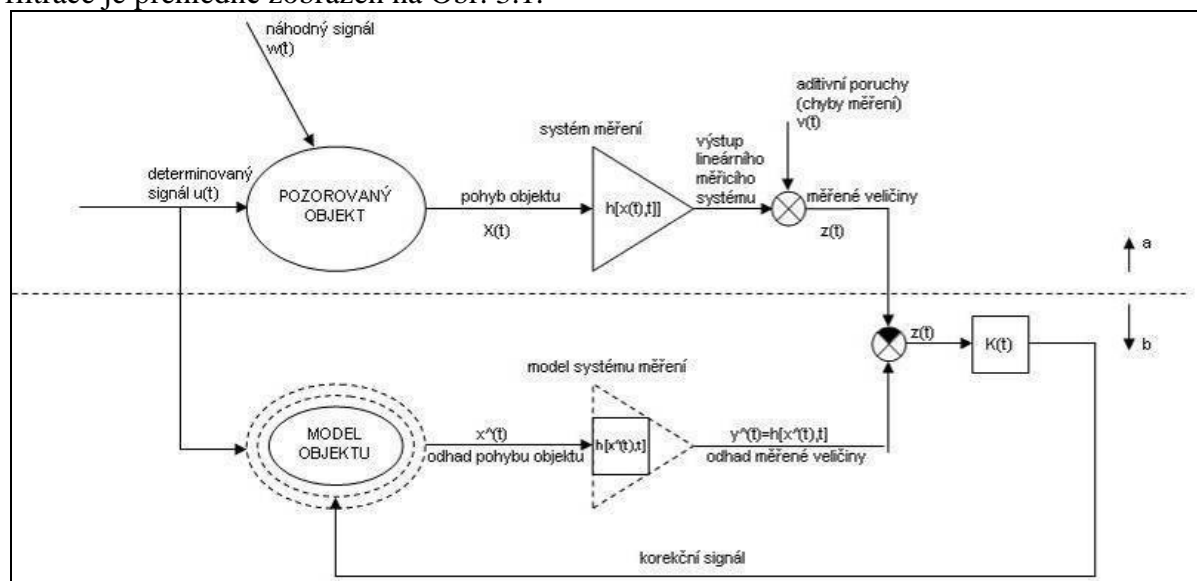
$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_{\alpha_f} - C_{\alpha_r}}{Um} & \frac{-C_{\alpha_f} l_f + C_{\alpha_r} l_r - U^2 m}{Um} \\ \frac{-C_{\alpha_f} l_f + C_{\alpha_r} l_r}{UJ_z} & \frac{-C_{\alpha_f} l_f^2 - C_{\alpha_r} l_r^2}{UJ_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \delta \begin{bmatrix} \frac{C_{\alpha_f}}{m} \\ \frac{C_{\alpha_f} l_f}{J_z} \end{bmatrix}$$

Veličina  $\delta$  (úhel natočení předních kol) je budící funkce, zatímco  $V$  a  $\varepsilon$  jsou odezvami systému.

### 3 DYNAMICKÁ FILTRACE

Je dán dynamický objekt, který je buzen známými a náhodnými signály  $u(t)$  a  $w(t)$ , jejichž vlivem se pohybuje. Pro možnost aplikace dynamické filtrace je nutné, aby bylo možné pohyb objektu popsat soustavou diferenciálních rovnic prvního řádu. Vzhledem k existenci šumu měření  $v(t)$ , náhodného působení  $w(t)$  na zkoumaný objekt nejsou známy okamžité hodnoty stavových veličin. Úlohou dynamického filtru je nalézt optimální neposunutý odhad stavového vektoru.

Základem dynamického filtru je model objektu, který vykonává setrvačný pohyb a pohyb vynucený známými signály  $u(t)$ . Součástí dynamického filtru je i model systému měření. Jeho úlohou je transformovat odhad  $x(t)$ , který je výstupem modelu objektu na odhad měřených veličin  $y(t)$ . Odhad měřených veličin  $y(t)$  se na rozdílovém členu porovnává s veličinou  $z(t)$ , naměřenou na skutečném objektu. Získaná odchylka  $e(t)$  je po vhodném zesílení členem  $K(t)$  použita pro korekci pohybu modelu. Jsou-li koeficienty matice zesílení voleny vhodně, souběh modelu objektu a pozorovaného objektu se bude postupně zlepšovat (bude se zlepšovat přesnost odhadu  $x(t)$ ). Protože vlastnosti modelu objektu a modelu systému měření závisí na odhadovaných veličinách  $x(t)$ , budou se postupně přibližovat vlastnostem identifikovaného objektu. Úlohou matice zesílení je tedy transformace odchylky odhadu měřených veličin  $y(t)$  od naměřených veličin  $z(t)$  na korekční signály. Princip dynamické filtrace je přehledně zobrazen na Obr. 3.1.

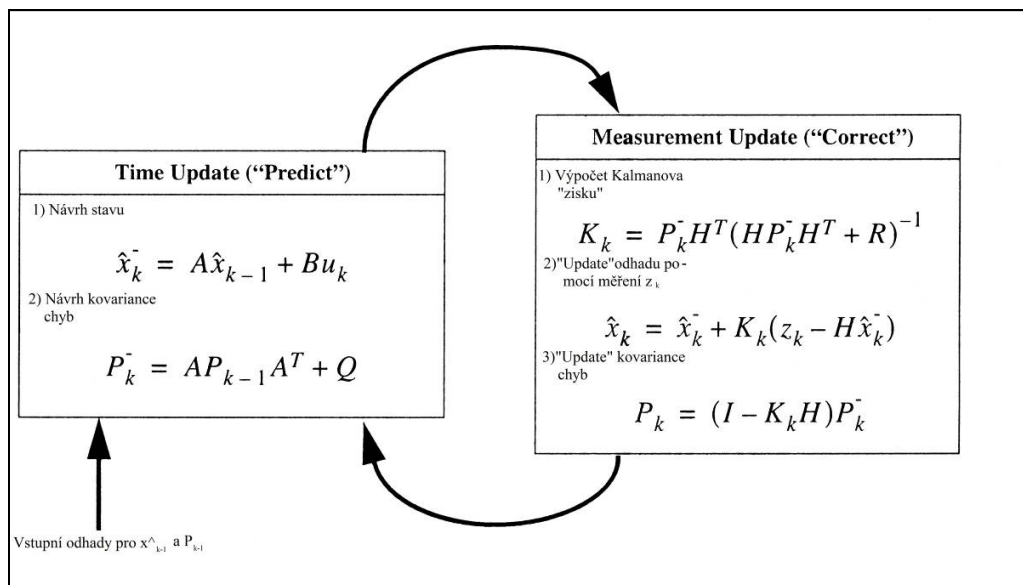


Obr. 3.1 Schéma principu dynamické filtrace

#### 3.1 Diskrétní Kalmanův filtr

Diskrétní Kalmanův filtr je jedním z jednodušších představitelů dynamických filtrů. Celý algoritmus Kalmanova filtru i s příslušnými rovnicemi je na Obr. 3.2. Význam jednotlivých veličin lze nalézt v seznamu symbolů a jednotek (viz str. 26).

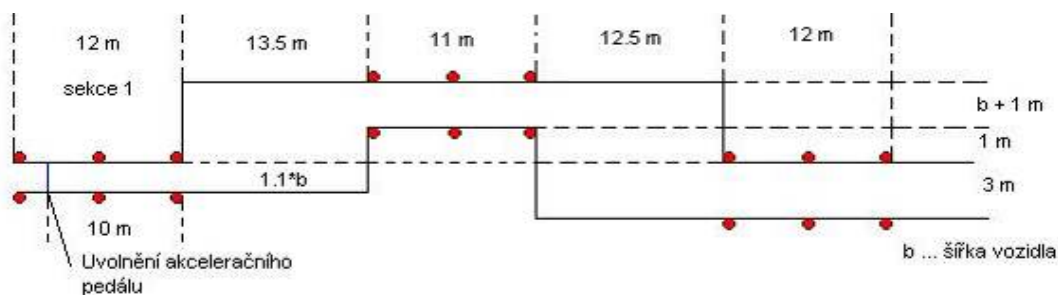




Obr. 3.2 Algoritmus diskrétního Kalmanova filtru

## 4 JÍZDNÍ MANÉVR

Pro propojení měření s matematickým modelem byl použit jízdní manévr, který byl uspořádán podle normy ISO 3888-2 [24]. Jedná se o tzv. předjížděcí manévr (náhlá změna jízdního pruhu). Uspořádání zkušební dráhy je schematicky znázorněné na Obr. 4.1. Základním principem tohoto testu je snaha řidiče o co nejrychlejší projíždění vytyčenou dráhou.



Obr. 4.1 Uspořádání zkušební dráhy podle normy ISO 3888-2

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ VOZIDLO

Jako experimentální vozidlo pro výzkum v oblasti analýzy jízdního manévru byla zvolena Formule Faster Ford 1600. Jedná se o formulové vozidlo rámové konstrukce, které má proti běžným osobním vozidlům s ohledem na zamýšlené úkoly celou řadu výhod. Především veškeré uložení částí zavěšení je realizováno s kulovými ložisky typu unibal. Není tak použito běžných pryžových silentbloků, které je velmi obtížné modelovat, a velmi ovlivňují chování vozidla při vyšších působících silách.

### 5.1 Měření hmotnostních parametrů experimentálního vozidla

Na základě provedeného měření (zjišťování radiálních reakcí pod koly vozidla vážením) a následném výpočtu (momentová rovnováha) bylo zjištěno, že v případě vozidla i s řidičem a palivem je poloha těžiště ve vzdálenosti  $b=1035,1$  mm od středu zadní nápravy a ve vzdálenosti  $a=1364,9$  mm od nápravy přední.

Moment setrvačnosti kolem osy  $z$  figuruje v momentové rovnici matematického modelu vozidla. Měření momentu setrvačnosti kolem osy  $z$  zkušebního vozidla bylo realizováno na speciálním zkušebním stavu, který byl navržen pro potřeby ÚADI (registrován jako funkční vzorek). Výsledky měření momentu setrvačnosti jsou uvedeny v Tab. 5.1.

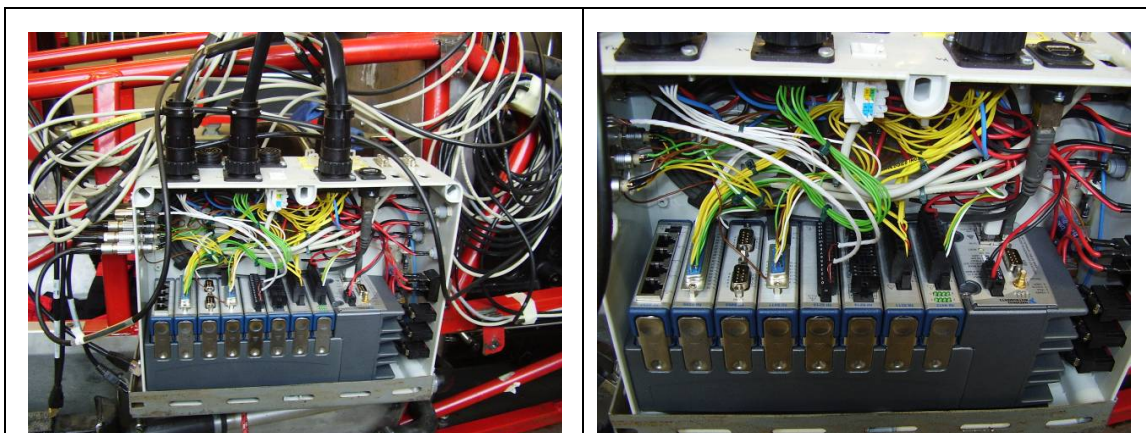
Tab. 5.1 Statistické vyhodnocení měřených momentů setrvačnosti experimentálního vozidla

Aritmetický průměr	540,4
Směrodatná odchylka	1,9
Chyba měření (opakovatelnost)	0,35%
Výsledná hodnota $J_z$ [kg m <sup>2</sup> ]	540,4±1,9

## 6 MĚŘICÍ SYSTÉM

K dosažení cílů stanovených v úvodu této práce je především nutné zvolit vhodný měřicí systém. Jako ideální řešení pro sběr dat byla vybrána jednotka CompactRIO od firmy National Instruments. Od stejného výrobce byl využit i software pro sběr dat – LabView. Samotné zpracování měřených dat a jejich následné propojování s matematickým modelem je realizováno v prostředí Matlab.

### 6.1 Hardwarová část



Obr. 6.1 Umístění měřicí jednotky CompactRIO na experimentálním vozidle

CompactRIO

CompactRIO je programovatelný univerzální měřicí a řídicí kontrolér určený pro průmyslové aplikace s požadavkem na práci v reálném čase. CompactRIO je pro snadné připojení jednotlivých senzorů vybaveno řadou vyměnitelných modulů (např. analogové vstupy, modul pro měření s tenzometry, termočlánků typu K, digitální vstupy atd.) – (viz. Obr. 6.1). V následujícím přehledu bude uveden seznam jednotlivých snímačů připojených k jednotce CompactRIO.

### **MBox**

MBox je zařízení vyvinuté na Ústavu konstruování VUT FSI Brno. Jedná se o box s integrovanými třemi snímači zrychlení a třemi snímači úhlové rychlosti.

- **Snímač zrychlení**

Použité snímače zrychlení jsou výrobkem firmy Analog Devices a nesou označení ADXL 105. Jedná se o tzv. kapacitní snímače zrychlení.

- **Snímače úhlové rychlosti**

Pro měření rychlostí klonění, klopení a stáčení je využito senzorů firmy Murata (Gyrostar ENV-05D-52), tzv. vibračních gyroskopů využívajících Coriolisovy síly.

### **Snímač zrychlení Stack**

Pro měření příčného zrychlení byl na experimentální vozidlo umístěn rovněž jednoosý snímač zrychlení od výrobce Stack.

### **Snímač zdvihu kola**

Pro měření zdvihů jednotlivých kol je použito lineárních potenciometrů výrobce Penny + Gilles (SLS 130/75). Snímače zdvihu kola jsou umístěny na těleso tlumiče a měří tak přímo stlačení pružiny (pohyb pístu tlumiče)

### **Snímač pohybu hřebenové tyče řízení**

Důležitým signálem pro rekonstrukci pohybu vozidla je úhel natočení volantu (budicí funkce). V tomto případě je k měření pohybu řízení využito lineárního potenciometru měřícího pohyb hřebenové tyče.

### **Snímač otáček kola**

Pro měření otáček jednotlivých kol je použito Hallových senzorů otáček firmy Bosch. Informaci z otáčkových čidel je možné využít v extrémních situacích pro určení prokluzu (resp. bloku) kol a také k určení rychlosti vozidla.

### **Snímač výšky**

Pro určení polohy odpružené hmoty vzhledem k vozovce je využito tří laserových snímačů výšky (Corrsys-Datron) využívajících principu optické triangulace.

### **Snímač brzdového tlaku**

Dva snímače tlaku od firmy Bosch měří tlaky v brzdových okruzích, což je vedle měření podélného zpomalení důležitá informace pro zkoumání podélné dynamiky.

### **Snímač teploty pneumatiky**

Pro měření teploty pneumatik za jízdy vozidla je použito infračervených pásmových pyrometrů s nastavitelnou emisivitou, jež jsou produktem firmy Omega. Měření je prováděno za kolem, kde je při opouštění běhounu z kontaktu s vozovkou na plášti nejvyšší teplota.

### **Měření polohy – Microsat GPS**

Pro měření rychlosti a zároveň polohy vozidla je určen Microsat GPS systém od firmy Corrsys-Datron. Vzorkovací frekvence zařízení je 20 Hz.

#### **Snímač úhlu otevření škrtkové klapky**

Pro měření úhlu otevření škrtkové klapky je použito rotačního potenciometru s úhlem 0-90 stupňů od firmy Bosch. Tento signál může být použit jak pro analýzu chování vozidla, tak pro určení případných zásahů jezdce v průběhu manévru.

#### **Motorové veličiny**

K systému CompactRIO jsou připojeny rovněž senzory, které mají vztah k motoru a jsou nutné pro bezproblémový provoz experimentálního vozidla. Jedná se o teplotu vody a oleje a tlak oleje. Teploty jsou snímány čidly firmy Jumo – Vibrotemp Pt100. Tlak oleje je řešen čidlem firmy VDO s běžným analogovým výstupem.

#### **Měření rychlosti – Correvit**

Rychlost vozidla jako i úhel směrové úchylnosti jsou zjišťovány speciálními optickými korelačními snímači Correvit v provedení S400 a V1 (firmy Corrsys-Datron). Výstupy ze senzoru S400 tvoří jak vstupy matematického modelu tak je těchto signálů využito pro korekci pohybu modelu v dalších částech práce.

#### **Snímač otáček motoru**

Pro měření otáček motoru je použito magnetorezistivního snímače firmy Pulsotronic. Jako referenční značky pro senzor je použito ozubeného věnce setrvačníku.

#### **Tenzometrické měření síly pod kolem vozidla**

Pro měření radiální reakce pod kolem vozidla je použito tenzometrů firmy HBM. Na každém z pushrodů jsou nalepeny dva tenzometry. Signály z těchto snímačů síly jsou prostřednictvím LAN kabelů vedeny na speciální modul jednotky CompactRIO. Rozložení zatížení pod jednotlivými koly vozidla je určující pro jeho chování. Zároveň se dá znalosti této hodnoty využít pro určení stavu, v jakém se nachází pneumatika (s ohledem na její charakteristiku) a v celé řadě dalších případů.

#### **Dashboard**

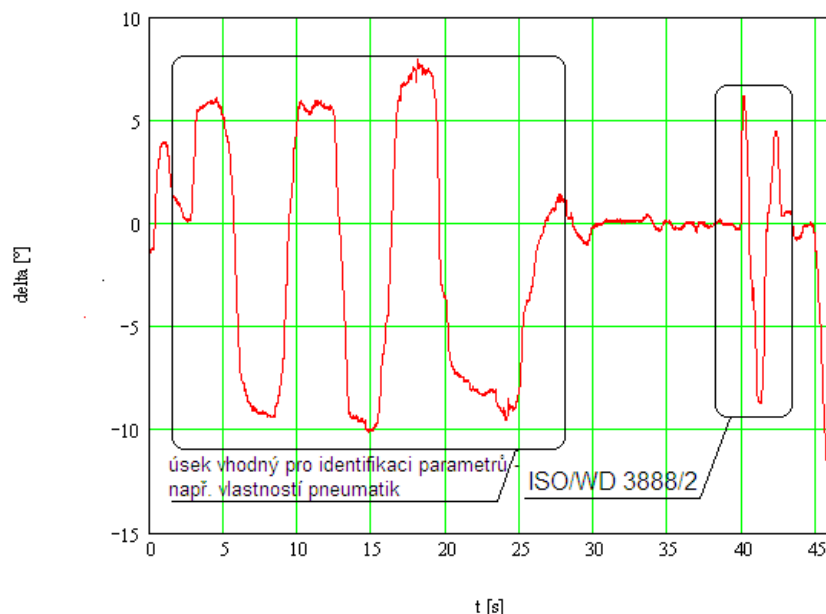
Jako zařízení, které zobrazuje nejdůležitější provozní údaje o vozidle pro obsluhu a jezdce (nahrazuje rovněž běžné palubní přístroje), stejně tak pro možné nastavování vlastností jednotky CompactRIO bez připojení vnějšího PC, je použito malého počítače firmy National Instrument (TPC-2106T).

## **6.2 Softwarová část**

Základní programové vybavení k měřicímu ústředí lze rozdělit na tři základní části. Pro samotný CompactRIO kontrolér je nutné vytvořit základní program pro zpracování časově kritických operací (řešeno pomocí programovatelného hradlového pole - FPGA) a následně program pro samotné zpracování, řízení a záznam dat. S ohledem na situace, kdy je nutné kompletně změnit nastavení měřicího řetězce, je vytvořena třetí aplikace, kde lze všechny změny nastavení měřicího ústředí provést. Každé nové nastavení je pak uloženo do vnitřní paměti kontroléru, který si jej při startu znovu načte. Všechny programy jsou vytvořeny v programovacím prostředí LabView.

## 7 MĚŘENÍ

Měření jízdních manévrů definovaných v Kap. 4 bylo provedeno na letištní ploše letiště Brno-Tuřany dne 22.5.2010 (viz. Obr. 7.1). Zkušební dráha byla uspořádána do dvou sekcí, kdy jedna byla určená pro manévr ISO/WD 3888/2, druhá potom pro manévr vhodný k identifikaci parametrů (např. směrová tuhost pneumatik apod.).



Obr. 7.1 Úhel natočení předních kol s vyznačením jednotlivých manévrů

## 8 PROPOJENÍ MĚŘENÍ S MATEMATICKÝM MODELEM

Rovnice popisující pohyb modelu vozidla mají tento obecný diferenční tvar:

$$\begin{bmatrix} V_{i+1} \\ r_{i+1} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_i \\ r_i \end{bmatrix} + B \cdot \delta$$

Použití Kalmanova filtru bude rozděleno na různé případy podle měřené veličiny, která bude použita pro srovnávání s modelem měření. Tento rozdíl mezi skutečným měřením a modelem měření slouží pro korekci „a priori“ odhadu na „posteriori“ odhad stavové veličiny. Ten je vlastně výstupem celého systému a ovlivňuje pohyb modelu.

Tab. 8.1 Matematické modely pro použití Kalmanova filtru

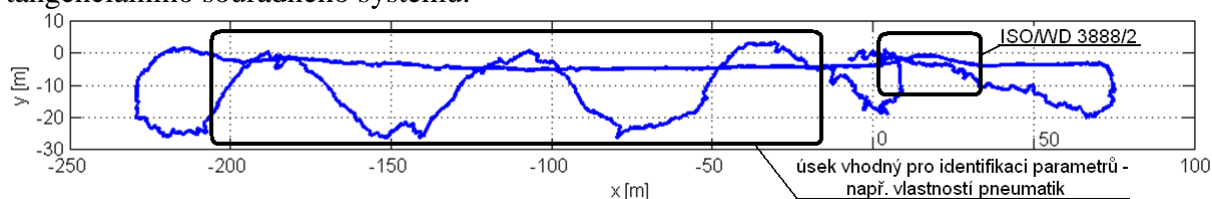
Varianta	Stavové veličiny	Měřené veličiny
1.	Příčná rychlost: $V$ Stáčivá rychlost: $r$	Příčná složka rychlosti měřená snímačem Correxit S400: $V_{cor}$ Stáčivá rychlost: $r$
2.	Příčná rychlost: $V$ Stáčivá rychlost: $r$	Příčná složka rychlosti měřená snímačem Correxit S400: $V_{cor}$ Stáčivá rychlost: $r$ Veličina: $a_y - B_I \beta_v$
3.	Příčná rychlost: $V$ Stáčivá rychlost: $r$ Úhel stáčení: $\varepsilon$ Y-ová souřadnice dráhy: $y$	Příčná složka rychlosti měřená zařízením Correxit S400: $V_{cor}$ Stáčivá rychlost: $r$ Veličina: $a_y - B_I \beta_v$ Y-ová souřadnice dráhy: $y$

## 8.1 Vstupy Kalmanova filtru

Některé z měřených veličin, jež jsou ukládány v průběhu jízdního manévru je nutné před vstupem do Kalmanova filtru upravit, popř. převést na vhodný formát. Zároveň pokud je měřená veličina použita rovněž pro korekci pohybu modelu je třeba určit rozptyl tzv. šumu měření (veličina  $R$  – viz Kap. 8.1.3).

### 8.1.1 Převod souřadnic GPS

V případě použití souřadnic dráhy pro korekci pohybu modelu v Kalmanově filtru je nejprve nutné změřené souřadnice GPS transformovat z geodetického souřadného systému WGS-84 do souřadného systému reprezentovaném běžnými souřadnicemi polohy  $[x,y]$  – např. lokální tangenciální souřadnicový systém. Na Obr. 8.1 je vidět dráha zkušební po převodu do tangenciálního souřadného systému.



Obr. 8.1 Dráha zkušebního testu v tangenciálním souřadném systému

### 8.1.2 Šum měření

Důležitým parametrem, který figuruje v algoritmu Kalmanova filtru je veličina  $R$  (viz. Kap. 3). Jedná se o rozptyl šumu měření. Tato hodnota určuje, zda je pro samotný Kalmanův filtr měření, které pohyb koriguje důvěryhodné nebo zda se filtr přikloní více k modelu. V Tab. 8.2 jsou vypočtené hodnoty šumu měření pro jednotlivé měřené veličiny použité pro korekci pohybu modelu.

Tab. 8.2 Hodnoty rozptylu šumu měření pro jednotlivé snímače

Měřicí zařízení	Hodnota rozptylu
Stáčivá rychlost $r$	0,02
Příčná rychlost $v$	0,0056
Příčné zrychlení $a_y$	0,2174
Souřadnice dráhy $y$	0,1389

### 8.1.3 Směrová tuhost pneumatik

Dalším z důležitých vstupů matematického modelu, který určuje jeho chování je směrová tuhost pneumatik. Pro potřeby této práce byla směrová tuhost určena s využitím údajů výrobce sportovních pneumatik, které jsou dostupné na internetu – viz [31].

Kolo přední nápravy:  $C_{\alpha fK} = 309,24 \text{ N/}^\circ$ , Celá přední náprava:  $C_{\alpha f} = 618,48 \text{ N/}^\circ$

Kolo zadní nápravy:  $C_{\alpha rK} = 487,12 \text{ N/}^\circ$ , Celá zadní náprava:  $C_{\alpha r} = 974,24 \text{ N/}^\circ$

## 8.2 Propojení měření s matematickým modelováním

### 8.2.1 Varianta 1

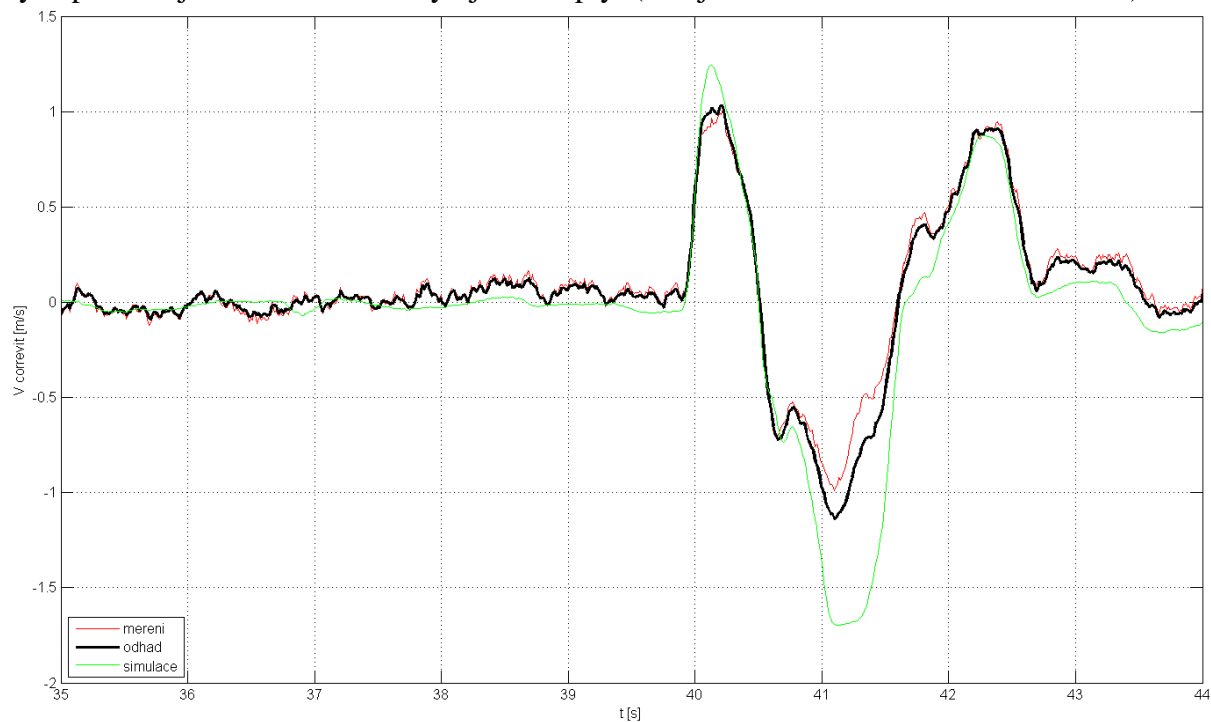
V případě Varianty 1 jsou měřené veličiny sloužící ke korekci pohybu modelu tyto:

$$z_i = \begin{bmatrix} V_{cor} \\ r \end{bmatrix}$$

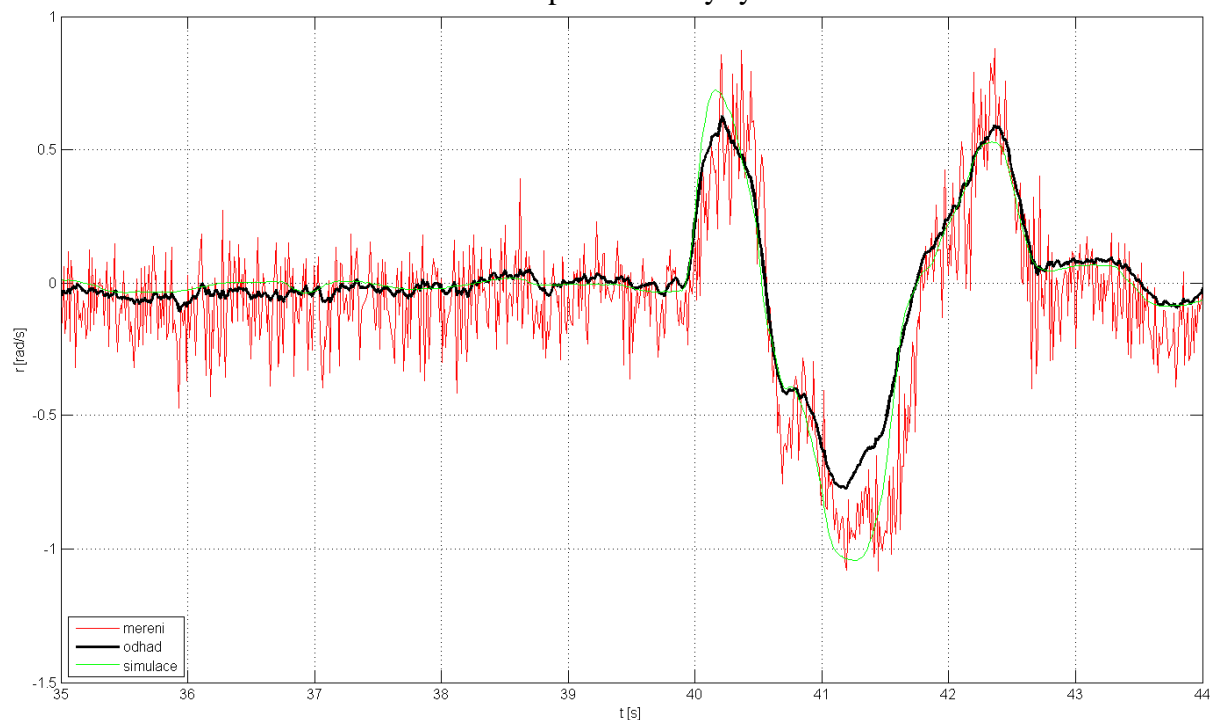
Matice měření  $H$  (matice vytvářející z „apriori“ odhadu stavové veličiny odhad měřené veličiny) má tvar:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Na Obr. 8.2 a 8.3 je vidět srovnání odhadu jednotlivých stavových veličin s veličinami měřenými a výstupy simulačního modelu (řešení soustavy rovnic). Je vidět dobrá shoda mezi odhadovanou a měřenou veličinou. Ta může být do jisté míry dána tím, že analogové výstupy ze senzoru Correvit jsou přímo v elektronické jednotce dodatečně průměrovány, což na výstupu snižuje šum měření a tedy i jeho rozptyl (filtr je nucen tomuto měření více věřit).



Obr. 8.2 Srovnání odhadu příčné složky rychlosti – Varianta 1



Obr. 8.3 Srovnání odhadu stáčivé rychlosti – Varianta 1

### 8.2.2 Varianta 2

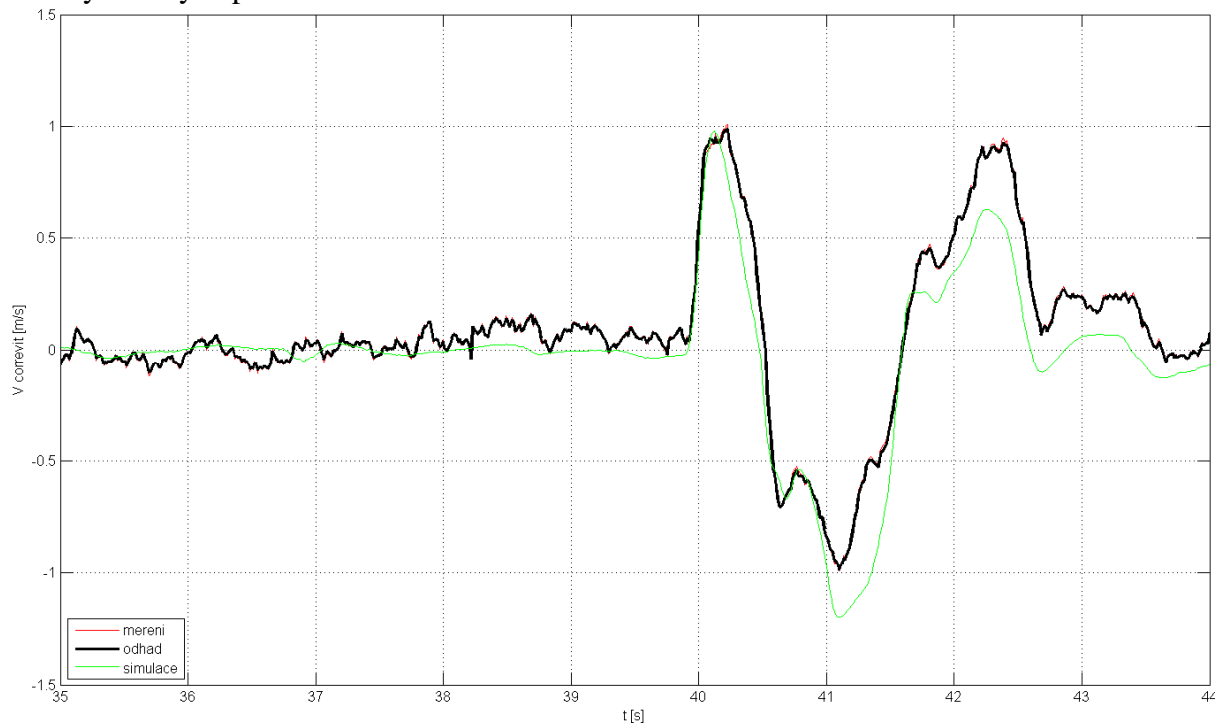
Druhá varianta Kalmanova filtru předpokládá použití stejných stavových veličin, pohyb modelu však bude vedle příčné složky rychlosti v místě Correvitu S400 a stáčivé rychlosti navíc korigován na základě signálu ze snímače příčného zrychlení (Stack). Matice měření:

$$\mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} V_{cor} \\ r \\ a_y - B_1 \cdot \delta \end{bmatrix}.$$

Matice  $H$  má tento tvar:

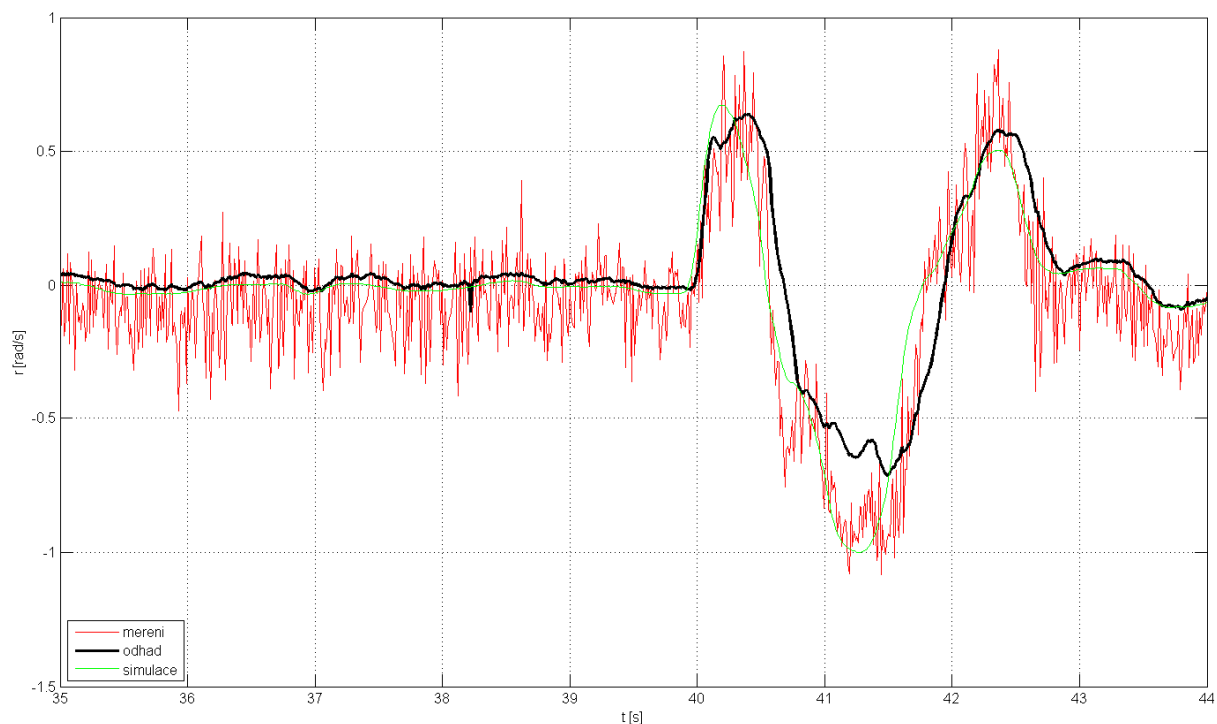
$$H = \begin{bmatrix} 1 & C \\ 0 & 1 \\ A_{11} & A_{12} + U \end{bmatrix}.$$

Na Obr. 8.5, 8.6 a 8.7 je vidět srovnání odhadů veličin (výstup Kalmanova filtru) s hodnotami měřeními a výstupem simulačního modelu.

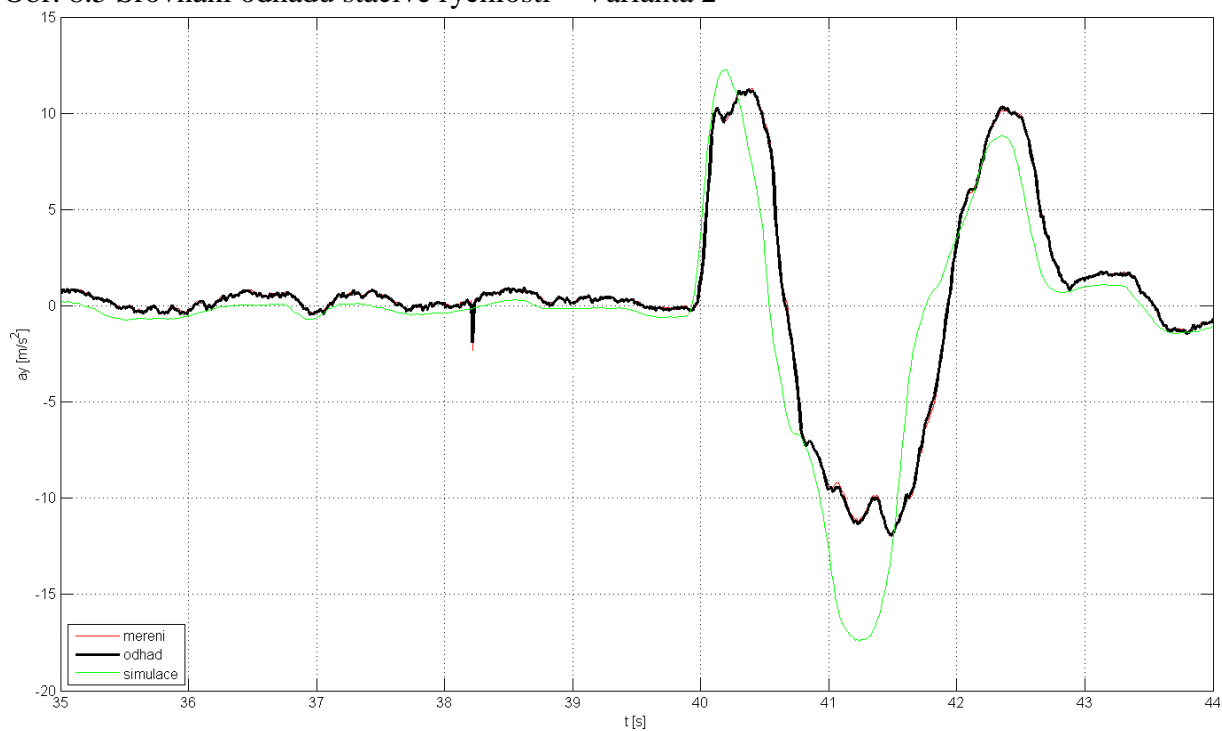


Obr. 8.4 Srovnání odhadu příčné složky rychlosti – Varianta 2





Obr. 8.5 Srovnání odhadu stáčivé rychlosti – Varianta 2



Obr. 8.6 Srovnání odhadu příčného zrychlení – Varianta 2

### 8.2.3 Varianta 3

Třetí varianta Kalmanova filtru využívá jako další měřenou veličinu y-ovou složku dráhy měřenou systémem Microsat GPS. Soustava diferenčních rovnic má obecně tento tvar.

$$\begin{bmatrix} V_{i+1} \\ r_{i+1} \\ \varepsilon_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_i \\ r_i \\ \varepsilon_i \\ y_i \end{bmatrix} + \delta \cdot B,$$

Kde:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & U & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

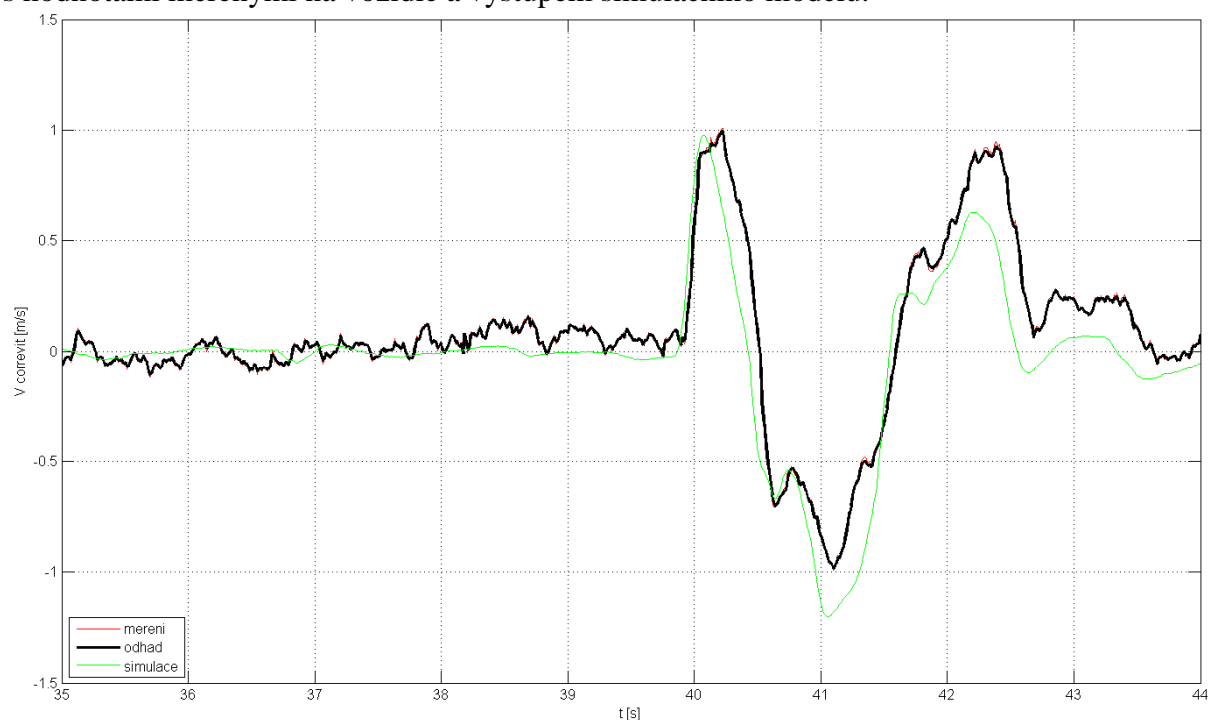
Vektor měření:

$$\mathbf{z}_i = \begin{bmatrix} V_{cor} \\ r \\ a_y - B_1 \cdot \delta \\ y \end{bmatrix}.$$

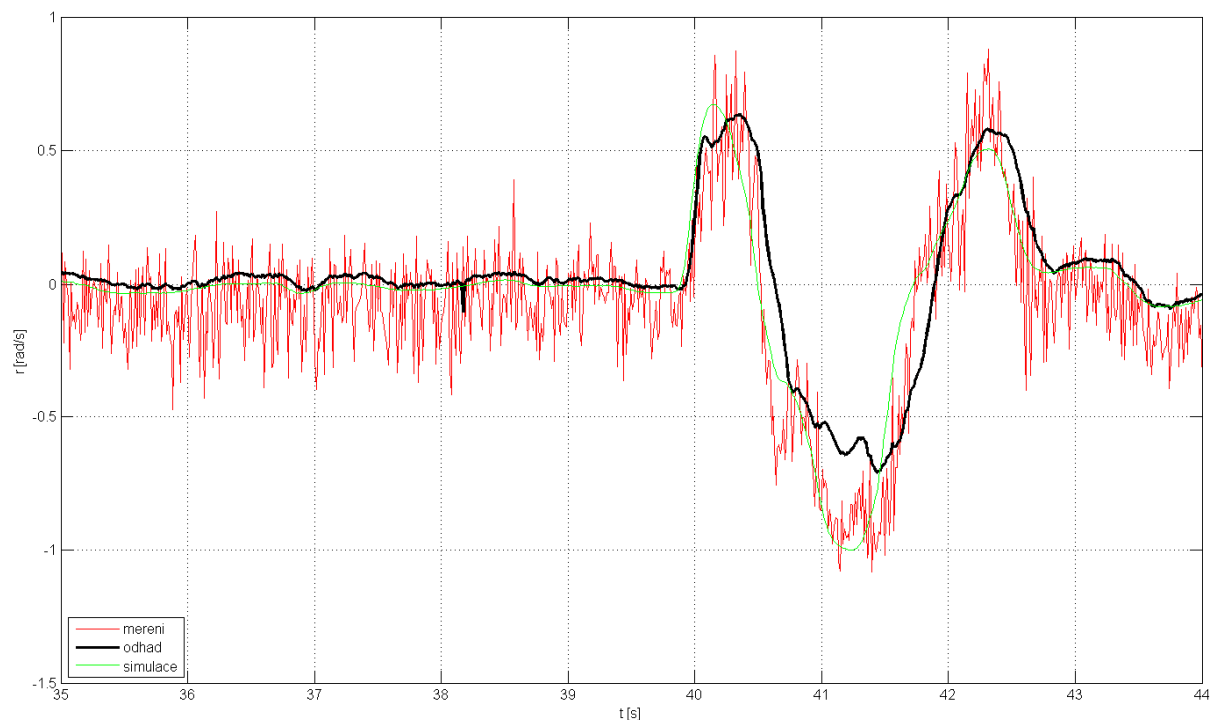
Matice  $H$ :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & C & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{11} & A_{12} + U & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

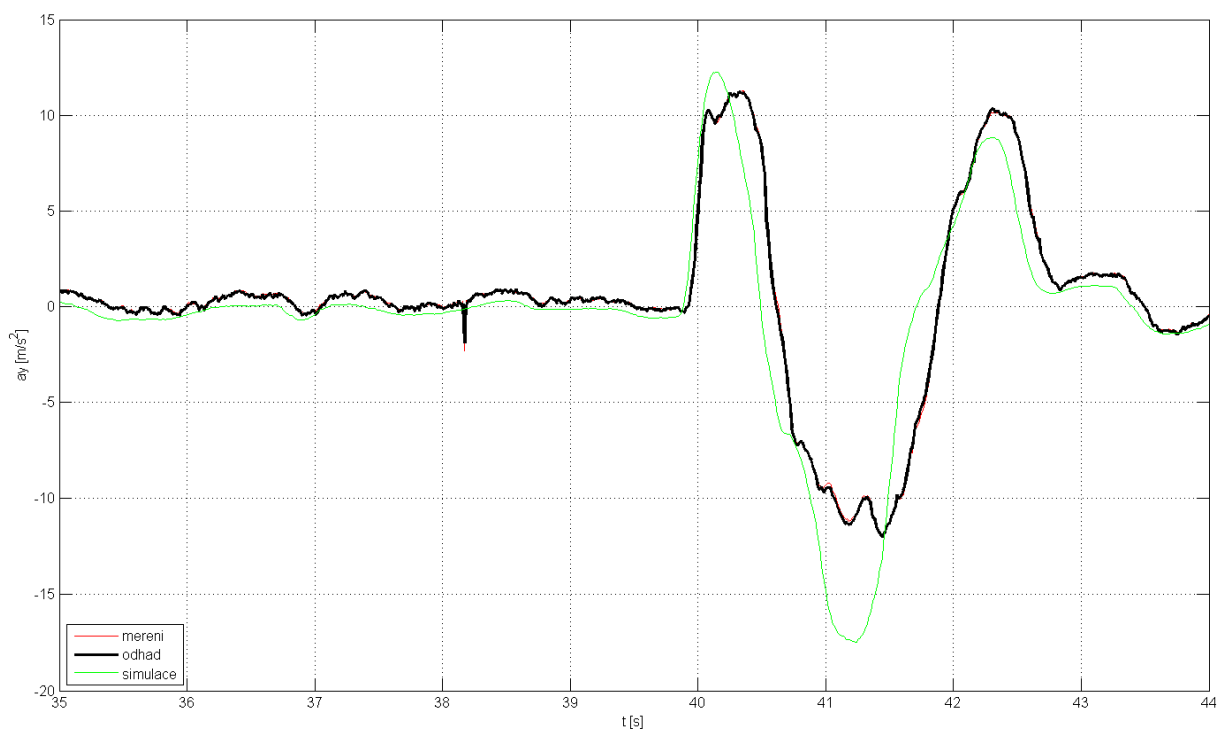
Na Obr. 8.9, 8.10, 8.11 a 8.12 je vidět srovnání odhadů (výstup diskrétního Kalmanova filtru) s hodnotami měření na vozidle a výstupem simulačního modelu.



Obr. 8.7 Srovnání odhadu příčné složky rychlosti – Varianta 3



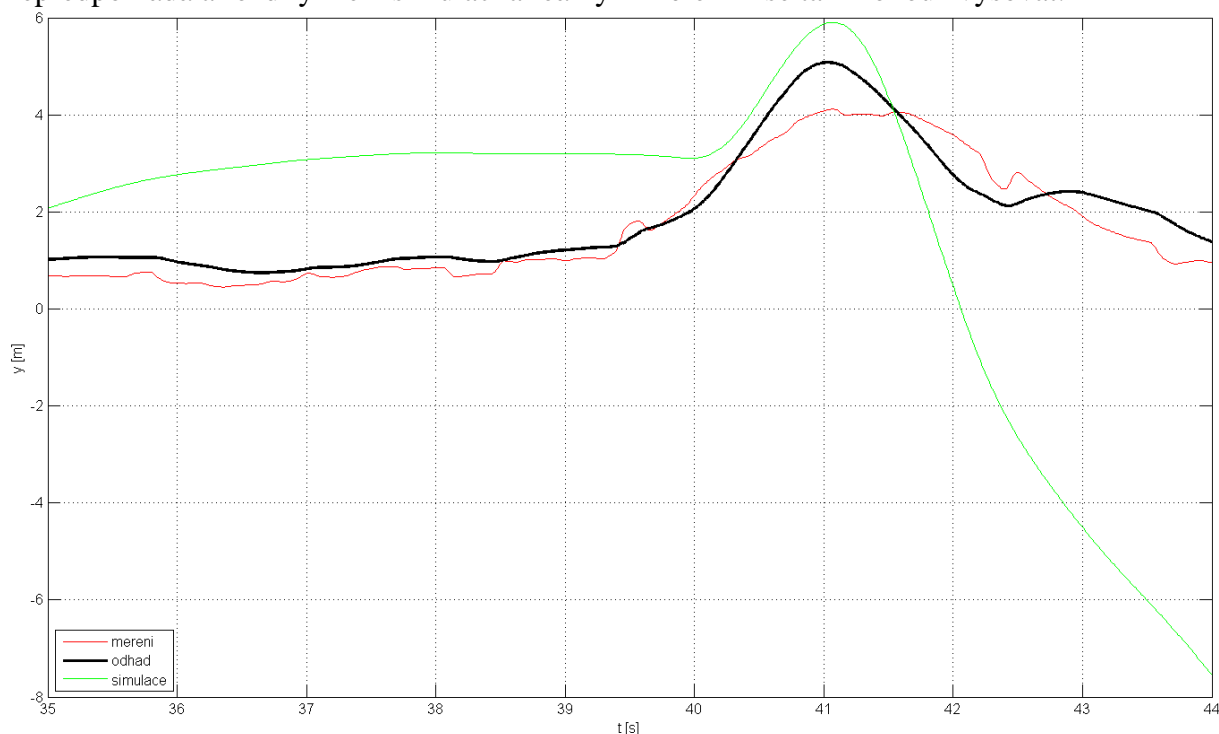
Obr. 8.8 Srovnání odhadu stáčivé rychlosti – Varianta 3



Obr. 8.9 Srovnání odhadu příčného zrychlení – Varianta 3

V grafu na Obr. 8.12 se projevují největší rozdíly mezi jednotlivými přístupy (průběhy). Jedním z důvodů by mohlo být linearizování vztahu pro určení souřadnice dráhy. Velký rozdíl mezi simulací a měřenou y-ovou souřadnicí dráhy měřicím zařízením Microsat GPS je nutné hledat v několika zjednodušeních matematického modelu a také ve vlivu budicí veličiny – tedy úhlu natočení předních kol. Pohyb modelového systému je ovlivňován budicí funkcí, která je dána měřeným signálem natočení předních kol (v našem případě pohybu hřebenové tyče). S ohledem na velmi strmé řízení (malý převod mezi pohybem volantu a natočením

předních kol), které je použito u experimentálního vozidla může drobný rozdíl ve vstupní hodnotě pohybu hřebene řízení znamenat velký vliv na výslednou vypočtenou dráhu. Další vlivy rozdílu mezi simulací a měřením (popř. odhadem) lze hledat v jisté „extrémnosti“ manévru s ohledem na hodnoty směrových úchylek a působících sil na vozidlo, což vede k těmto rozdílům. Hodnoty směrových úchylek jsou mimo lineární oblast, což ve skutečnosti vzhledem k degresivní charakteristice pneumatik vede ke snižování míry nárůstu bočních vodících sil na kole. Model však předpokládá další lineární nárůst této síly v závislosti na rostoucí směrové úchylce a tím růst bočních vodících sil na kolech a tedy i lepší „zatáčivost“ vozidla. Dále se při skutečném manévru mění odklony, radiální zatížení atd., což model nepředpokládá a rozdíly mezi simulací a reálným měřením se tak mohou zvyšovat.



Obr. 8.10 Srovnání odhadu y-ové souřadnice dráhy – Varianta 3

### 8.3 Analýza vlivu směrové tuhosti pneumatik

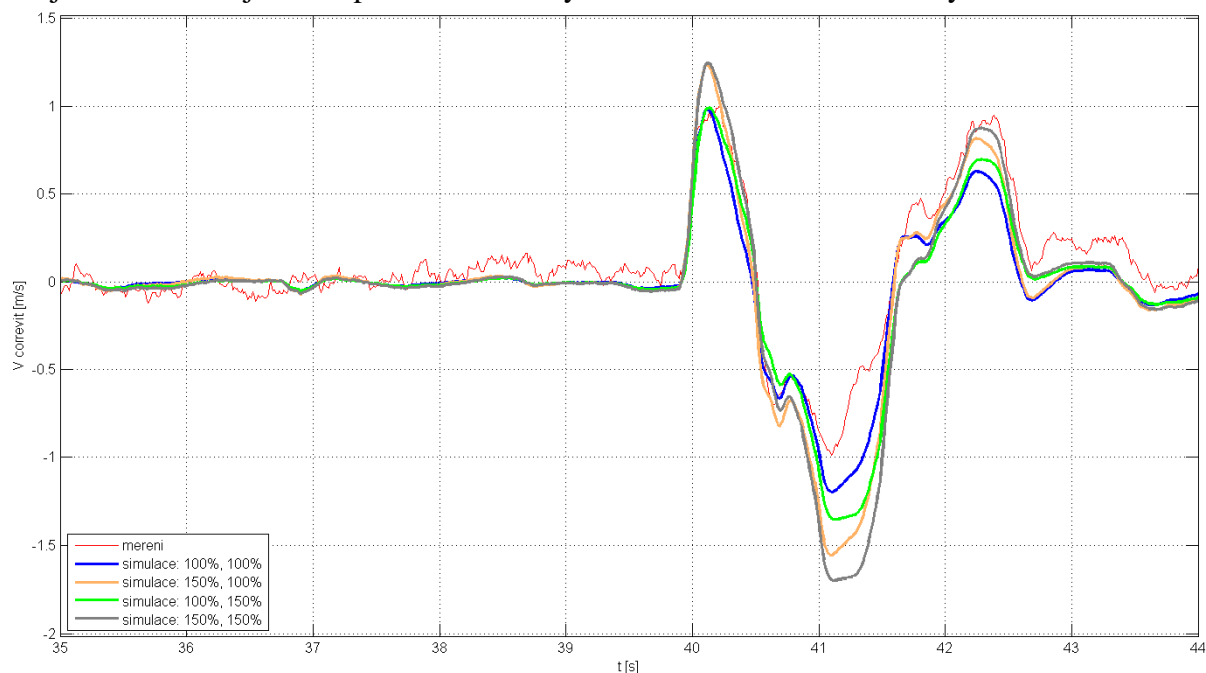
Směrová tuhost pneumatik je vstupní veličinou, jež výrazně ovlivňuje chování matematického modelu (i skutečného vozidla). V této kapitole bude provedena analýza vlivu směrové tuhosti pneumatik na chování modelového systému. Pro řešení soustavy rovnic popisující chování matematického modelu je využito metody Runge-Kutta 4. řádu (řešeno v programu Matlab).

Na Obr. 8.20 a 8.21 jsou zobrazeny výstupy simulačního modelu v závislosti na vstupní hodnotě směrové tuhosti pneumatiky. Jedná se o průběh příčné složky rychlosti v místě optického snímače rychlosti Correvit (Obr. 8.20) a stáčivé rychlosti (8.21).

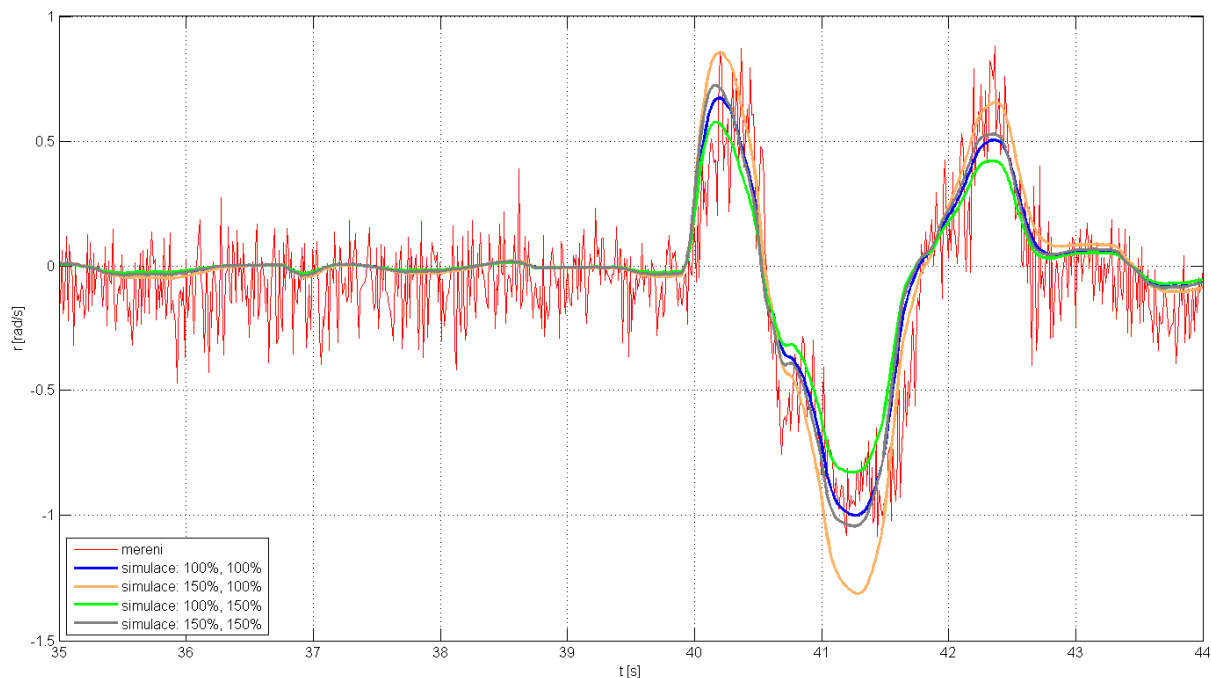
Křivky na Obr. 8.20 a 8.21 vyznačené oranžovou barvou vyjadřuje průběhy, jestliže je směrová tuhost předních pneumatik 1,5násobkem hodnoty původní (hodnota směrové tuhosti zadních pneumatik zůstává nezměněna). Zelené průběhy jsou případem, kdy je zvýšena naopak směrová tuhost zadních pneumatik (znovu na 1,5 násobek hodnoty původní), přičemž hodnota směrových tuhostí předních pneumatik zůstává nezměněna. Poslední variantou je zvýšení směrových tuhostí pneumatik na obou nápravách na 1,5násobek hodnoty původní.

Jestliže je zvýšena směrová tuhost na přední nápravě, dá se očekávat přechod směrem k přetáčivosti a tedy i k vyšším hodnotám stáčivé rychlosti. Naopak zvýšení hodnoty směrové tuhosti kol na zadní nápravě vede k více nedotáčivému chování vozu (modelu) a tedy i k nižším hodnotám stáčivých rychlostí. Rozdíly v chování reálného vozidla (měřené veličiny)

od hodnot, které vyjadřují simulační výstupy modelu především v druhé části manévru lze vysvětlit již limitním chováním vozidla na mezi adheze, kdy jsou hodnoty směrových úchylek pneumatik mimo lineární oblast. Dalšími vlivy jsou již dány dynamikou manévru, změnami zatížení, změnami odklonu při klopení karoserie, funkcí stabilizátorů a dalšími, které nejsou ve zjednodušeném jednostopém rovinném dynamickém modelu uvažovány.



Obr. 8.11 Analýza vlivu směrové tuhosti pneumatik na chování matematického modelu – průběh příčné složky rychlosti na optickém snímači Correvit



Obr. 8.12 Analýza vlivu směrové tuhosti pneumatik na chování matematického modelu – průběh stáčivé rychlosti

## 9 DOPORUČENÍ DALŠÍHO POSTUPU

Na straně matematického modelu se nabízí k použití celá řada dalších modelů vozidla. Z jednoduchého jednostopého modelu lze přejít k modelu dvoustopému a zároveň z modelu rovinného k modelu prostorovému. Právě pro využití prostorového modelu již byly v rámci této práce učiněny první kroky. Byla vyvinuta metodika měření polohy kinematických bodů zavěšení s využitím optických scannerů.

I v případě měřicího systému lze nalézt jisté problémy, které je třeba řešit. Jedná se např. o nahrazení systému Microsat GPS jiným GPS zařízením s ohledem na potřebné přesné měření polohy (souřadnic dráhy). Zároveň s ohledem na pozdější správné určení rozptylu šumu měření jednotlivých veličin je třeba detailně zmapovat, jak jsou signály přímo z některých senzorů filtrovány.

Diskrétní Kalmanův filtr je základním představitelem dynamických filtrů. Je možné jistě využít některých dokonalejších metod dynamické filtrace, což by v některých případech mohlo vést k upuštění od „znepřesňujících“ linearizací veličin v rovnicích popisujících chování modelového systému. Věc, která si rovněž zaslouhuje velkou pozornost, je veličina rozptylu šumu procesu, která figuruje v algoritmu dynamických filtrů. Je třeba vypracovat přesnou metodiku získávání těchto hodnot.

### Identifikace parametrů – směrová tuhost pneumatik

Jak již bylo zmiňováno v jiných kapitolách této dizertační práce, může být právě Kalmanův filtr (popř. jiný dynamický filtr) silným nástrojem pro určení (identifikaci) důležitých parametrů vozidla, které jsou jinak jen obtížně měřitelné, popř. se mohou v průběhu provozu vozidla měnit. Jedná se např. o směrovou tuhost pneumatiky, momenty setrvačnosti atd.

### Prostorový dynamický model vozidla

Pro další zpřesnění celého postupu dynamické filtrace a přiblížení chování modelového systému realitě je možné použít podrobnější dynamický model vozidla. Je možné velmi často používaný jednostopý rovinný dynamický model vozidla nahradit modelem prostorovým. S ohledem na výše zmíněné skutečnosti je však nutné s dostatečnou přesností zajistit další potřebné vstupy pro tento prostorový model. Jedná se především o výšku těžiště vozidla (popř. odpružené hmoty) a také polohu jednotlivých kinematických bodů náprav pro určení dalších parametrů jako je např. poloha středu klopení náprav a jejich poloha vůči těžišti vozidla atd. Přestože nebylo prostorového modelu v této práci využito, byly provedeny již některé práce v této oblasti pro jeho možné pozdější nasazení. Především byly s využitím optických scannerů dostupných na ÚADI (Tritop a Atos) změřeny polohy jednotlivých kinematických bodů zavěšení.

### Další typy filtrů – rozšířený Kalmanův filtr

Další práce v oblasti propojení měření s matematickým modelem principy dynamické filtrace na ÚADI předpokládají nahrazení lineárního diskrétního Kalmanova filtru jinými typy filtrů, kdy je možné využít i nelineárních rovnic popisujících chování modelového systému. Jedná se např. o rozšířený Kalmanův filtr, Unscented Kalmanův filtr nebo diskrétní diferenční filtr.

## ZÁVĚR

Dizertační práce byla zaměřena na propojení měření s matematickým modelem s využitím principů dynamické filtrace. Jako vhodný matematický model vozidla byl zvolen velice často používaný jednostopý rovinný model vozidla. Důležitým úkolem a cílem práce bylo vytvořit vhodný měřicí systém, který by mohl poskytnout dostatečně přesné vstupy matematického modelu a zároveň veličiny pro korekci pohybu modelu. Jako základ měřicího systému byla zvolena jednotka CompactRIO, k níž byla připojena celá řada snímačů schopná popsat dynamické chování vozidla v průběhu jízdního manévru. Navržený měřicí systém disponuje výhodnými parametry jak s ohledem na vzorkovací frekvence jednotlivých vstupů, celkové paměti pro ukládání dat, rozšiřitelnost systému, vlastní snadno ovladatelný software atd. Právě měřicí systém vytvořený v rámci této práce lze chápat jako velký přínos pro jakékoliv další práce zabývající se studiem dynamiky vozidel popř. přímo analýzou jízdního manévru vozidla. Měřicí systém může být rovněž využíván pro výuku na ÚADI. Dalším z cílů práce, který se podařilo splnit, bylo zajištění přesných vstupů matematického modelu. Jedná se především o veličiny charakterizující vlastnosti experimentálního vozidla jako např. moment setrvačnosti vzhledem k ose  $z$ , atd. Do oblasti zajištění přesných vstupů figurujících v rovnicích matematického modelu patří jistě i vyvinuté postupy pro přesné určení polohy jednotlivých měřicích zařízení v souřadném systému vozidla s využitím optických scannerů. Velký význam mají i informace o poloze bodů zavěšení, jejichž metodika měření byla rovněž vyvinuta v rámci této dizertační práce a byla rovněž publikována. Význam znalosti těchto bodů získá na významu především až s využitím složitějších matematických modelů vozidla použitých pro propojení s měřením dynamickými filtry (např. prostorový model vozidla).

Samotná rekonstrukce pohybu vozidla během jízdního manévru, který byl uspořádán podle normy ISO/WD 3888/2, byla provedena experimentálním vozidlem formule Ford 1600 na ploše brněnského letiště. Byly realizovány tři varianty Kalmanova filtru lišící se měřenými veličinami, jež jsou určeny pro korekci pohybu modelu vozidla. Rozdíly mezi odhady Kalmanova filtru, měřenými veličinami a také simulacemi provedenými na základě řešení soustavy rovnic popisující chování modelového systému metodou Runge-Kutta jsou diskutovány v dalších kapitolách dizertační práce.

V závěru jsou určeny možné směry dalších prací v oblasti pro zefektivnění a zpřesnění celého postupu dynamické filtrace. Jedná se především o zajištění exaktních hodnot některých vstupů, jejichž důležitost byla prokázána simulacemi v této práci. Zároveň je třeba se zaměřit na určení dalších parametrů figurujících v rovnicích Kalmanova filtru jako např. procesní šum. Další cesty k vylepšení zde prezentovaných postupů vedou k přesnějším modelům a také využití dalších v mnoha ohledech dokonalejších filtrů jako např. rozšířený Kalmanův filtr atd. Hlavní výzkum v oblasti algoritmů dynamických filtrů by však mohl vést především směrem k identifikaci různých parametrů vozidlového systému s využitím těchto filtrů. Jde především o jinak těžko měřitelné parametry typu směrové tuhosti pneumatik nebo momentu setrvačnosti kolem osy  $z$ . Jsou však součástí algoritmů různých elektronických asistenčních prvků dnešních moderních vozidel. Bylo by proto výhodné, aby tato identifikace byla v těchto elektronických prvcích pasivní bezpečnosti přímo integrována.

Veškeré cíle, které si tato práce v úvodu stanovila, se podařilo splnit. Zůstala celá řada úkolů k dalšímu zkoumání. Nebylo však ambicí této práce veškeré problémy související s efektivním využíváním dynamických filtrů kompletně vyřešit. Vzhledem k šíři celé problematiky by to nebylo ani možné. Věřím však, že vytvořená dizertační práce dá možnost celému Ústavu automobilního a dopravního inženýrství se do výzkumu v této oblasti zapojit. Zároveň se domnívám, že dobré zázemí především v oblasti experimentální a určování vstupů matematických modelů bylo díky této dizertační práci vytvořeno.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HONEC, J.: *Teorie automatického řízení III*. 2. vyd. Brno: Nakladatelství VUT, 1991. 97 s. ISBN 80-214-0320-9.
- [2] HRDINA, Z.: *Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK*. 1. vyd. Praha: 1997.
- [3] MACA, E.: *Statistika*. 1. vyd. Brno: VSŽ Brno, 1994. 122 s. ISBN 80-7157-107-5.
- [4] MAROŠ, B., MAROŠOVÁ, M.: *Základy numerické matematiky*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1997. 126 s. ISBN 80-214-0826-X
- [5] MILLIKEN, W., MILLIKEN, D.: *Race Car Vehicle Dynamics*. 1st edition. Warrendale: SAE, 1995. 857 s. ISBN 1-56091-526-9.
- [6] MOHINDER, S., GREWAL, A.: *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. 2nd Edition. Washington: John Wiley and Sons. 2001. ISBN 0-471-26638-8.
- [7] RAPANT, P.: *Družicové polohové systémy*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002. 181 s. ISBN 80-248-0124-8.
- [8] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: VLK, 2001. 421 s. ISBN 80-238-5273-6
- [9] VLK, F.: *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: VLK, 2001. 576 s. ISBN 80-238-7282-6.
- [10] ZEHNULA, K.: *Snímače neelektrických veličin*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1983.
- [11] BLAŽÁK, O.: *Analýza jízdního manévru vozidla*. Brno, 2003. 79 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství VUT Brno. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš PhD.
- [12] RYU, J.: *State and Parameter Estimation for Vehicle Dynamics Control Using GPS*. Stanford, 2004. 125 s. Dissertation submitted to the department of mechanical engineering and the committee on graduate studies of Stanford university
- [13] DOČKAL, A., HÉDL, M., MAZÚREK, I., SINGULE, V.: Měřicí box pro diagnostiku dynamických parametrů vozidel při jízdě. In *Inženýrská mechanika 2002, národní konference s mezinárodní účastí*. Brno: UMT FSI VUT, 2002. s. 41-42. ISBN 80-214-2109-6.
- [14] KLEDUS, R., PORTEŠ, P., VÉMOLA, A., ZELINKA, A.: Měření jízdních manévru vozidel. In *10. výroční konference Evropské společnosti pro výzkum a analýzu nehod*. Brno: Ústav soudního inženýrství VUT v Brně, 2001. s. 6-45
- [15] LAURINEC, M.; PORTEŠ, P.; BLAŽÁK, O. Discrete- difference filter in vehicle dynamics analysis. In *Recent Advances in Mechatronics*. 1. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. s. 19-24. ISBN 978-3-642-05021- 3.
- [16] PORTEŠ, P.: Rekonstrukce pohybu automobilu na základě měřených signálů. In *Inženýrská mechanika 2002*. Brno: Ústav mechaniky těles, VUT FSI Brno, 2002. s. 1-8. ISBN 80-214-2109-6.
- [17] PORTEŠ, P., BLAŽÁK, O. Utilization of Optical Systems TRITOP - ATOS in Vehicle Dynamics. In *Advances in Automotive Engineering, Volume II*. 1st edition. Brno: Tribun EU, 2008. s. 93-102. ISBN: 978-80-7399-497- 6.
- [18] PORTEŠ, P.; BLAŽÁK, O. Experimental Vehicle for Vehicle Dynamics Research. In *Advances in Automotive Engineering, Volume II*. 1st edition. Brno: Tribun EU, 2008. s. 103-110. ISBN 978-80-7399-497- 6.
- [19] PORTEŠ, P.; BLAŽÁK, O. Využití 3D scannerů během konstrukčního návrhu a v simulačních výpočtech vozidla. In *Koka '07*. Bratislava: Vydavatelství STU Bratislava, 2007. s. 273-283. ISBN 978-80-227-2714-3.
- [20] PORTEŠ, P.; BLAŽÁK, O. Identifikace vstupních parametrů a verifikace matematických modelů vozidla s využitím 3D optických scannerů. In *Vozidlá 2007*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 2007. s. 174-179. ISBN 978-80-8069-942-0.



- [21] PORTEŠ, P.; LAURINEC, M.; BLAŤÁK, O. Analysis of Vehicle Dynamics using Kalman Filter. In *Simulation Modelling of Mechatronic Systems III*. Mechatronics. Brno: Brno University of Technology, Faculty on Mechanical Engineering, 2007. s. 215-232. ISBN 978-80-214-3559- 9.
- [22] VENHOVENS, P., NAAB, K.: *Vehicle Dynamics Estimation Using Kalman Filters*. Vehicle System Dynamics. 1999.
- [23] WELSCH, G., BISHOP, G.: *An Introduction to the Kalman Filter*. Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill. březem 2002.
- [24] Passenger cars – Test track for a severe lane change manoeuvre. Part 2: Obstacle avoidance ISO/WD 3888-2; 1999.
- [26] Corrsys-Datron GPS sensors-MicroSAT. [online]. URL: [http://www.corrsys-datron.com/gps\\_sensors.htm](http://www.corrsys-datron.com/gps_sensors.htm) [cit. 2010-10-06].
- [27] Piezoelectric Vibrating Gyroscopes. [online]. URL: <http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s42e.pdf> [cit. 2010-10-06].
- [28] CompactRIO. [online]. URL: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/global/lang/en/pg/1/sn/n24:cRIO> [cit. 2010-10-06].
- [29] User Manual TPC – 2106T. [online]. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372254a.pdf> [cit. 2010-10-06].
- [30] Bosch Sensors. [online]. URL: <http://www.bosch.com> [cit. 2010-10-06].
- [31] Avon – ACB10 stabrig data. [online]. URL: <http://www.avonracing.com/Downloads.aspx> [cit. 2010-10-06].

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A$	[-]	matice soustavy
$a (l_f)$	[m]	vodorovná vzdálenost těžiště od přední nápravy
$B$	[-]	matice buzení
$b (l_r)$	[m]	vodorovná vzdálenost těžiště od zadní nápravy
$C_\alpha$	[N/°]	směrová tuhost pneumatiky
$C_{\alpha f}$	[N/°]	směrová tuhost pneumatiky přední nápravy
$C_{\alpha r}$	[N/°]	směrová tuhost pneumatik zadní nápravy
$C$	[m]	vzdálenost optického snímače Correvit S400 od těžiště vozidla
$F_y$	[N]	boční vodící síla kola
$F_{yf}$	[N]	boční vodící síla na přední nápravě
$F_{yr}$	[N]	boční vodící síla na zadní nápravě
$H$	[-]	modulační matice (matice měření)
$H_f$	[N]	obvodová síla na přední nápravě
$H_r$	[N]	obvodová síla na zadní nápravě
$H$	[s]	krok metody pro řešení diferenciálních rovnic
$J_z$	[kg m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti k ose z
$K$	[-]	Kalmanův zisk (matice zesílení)
$M_Z$	[N m]	vratný moment
$M$	[kg]	hmotnost vozidla
$n_k$	[m]	zavlek kola
$O_V$	[N]	vzdušný odpor
$P^-$	[-]	apriori kovariance odhadové chyby
$P$	[-]	posteriori kovariance odhadové chyby
$Q$	[-]	rozptyl šumu procesu
$R$	[-]	rozptyl šumu měření
$r (\varepsilon)$	[rad s <sup>-1</sup> ]	stáčivá rychlost kolem osy z
$T$	[s]	čas
$U (v_x)$	[m s <sup>-1</sup> ]	podélná rychlost
$u(t)$	[-]	vektor budících veličin
$V$	[m s <sup>-1</sup> ]	okamžitá rychlost jízdy (rychlost těžiště)
$v_y (V)$	[m s <sup>-1</sup> ]	příčná rychlost
$W(t)$	[-]	vektor náhodných budících veličin
$x(t)$	[-]	vektor stavových veličin
$\hat{x}^-$	[-]	apriori odhad stavové veličiny
$\hat{x}$	[-]	posteriori odhad stavové veličiny
$y(t)$	[-]	vektor výstupních veličin
$z(t)$	[-]	vektor měřených veličin
$\alpha$	[rad]	úhel směrové úchyly těžiště
$\alpha_r$	[rad]	úhel směrové úchyly na přední nápravě
$\alpha_r$	[rad]	úhel směrové úchyly na zadní nápravě
$\beta_v$	[rad]	úhel natočení předních kol
$\varepsilon$	[rad]	úhel stáčení

# ŽIVOTOPIS

## Osobní údaje

Jméno / Příjmení  
Adresa  
Telefon  
E-mail  
Státní příslušnost  
Datum narození

### Ondřej Blaták

Tománkova 5, Přerov, 750 02  
+420 604 419 860  
[ondrej.blatak@seznam.cz](mailto:ondrej.blatak@seznam.cz)  
Česká republika  
26.2.1980

## Pracovní zkušenosti

Období  
Povolání nebo vykonávaná funkce  
Hlavní pracovní náplň a oblasti  
odpovědnosti

Název/jméno zaměstnavatele  
Obor činnosti či odvětví

Období  
Povolání nebo vykonávaná funkce  
Hlavní pracovní náplň a oblasti  
odpovědnosti  
Název/jméno zaměstnavatele  
Obor činnosti či odvětví

Období  
Povolání nebo vykonávaná funkce  
Hlavní pracovní náplň a oblasti  
odpovědnosti

Název/jméno zaměstnavatele  
Obor činnosti či odvětví

## Vzdělání, odborná příprava a školení

Období  
Dosažená kvalifikace  
Obor  
Název a typ organizace, která  
poskytla vzdělání

Období  
Dosažená kvalifikace  
Obor  
Název a typ organizace, která

1/2006-dosud

### Asistent

- realizace technických experimentů pro potřeby vědecko-výzkumné činnosti Ústavu automobilního a dopravního inženýrství
- zajišťování výuky (přednášky a cvičení) studentů 4. a 5. ročníku magisterského studia v předmětech Motorová vozidla, Automobily, Virtuální prototypy, Průmyslový projekt
- řešení grantových programů v oblasti jízdní dynamiky a ovladatelnosti vozidel
- vedení bakalářských a diplomových prací
- organizace přednášek významných výrobců komponent vozidel a dalších subjektů z oblasti dopravy na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství
- publikační činnost (sborníky konferencí)

### Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojního inženýrství

Vědecko-výzkumná činnost, pedagogická činnost

4/2004-4/2006

### OSVČ

- návrh, zpracování a výroba reklamy v oblasti motoristického sportu
- šíření reklamy, průzkum trhu

Reklamní činnost a marketing

2003- 2006

### Poradenství v oblasti jízdní dynamiky vozidel

- poradenská činnost v oblasti rozboru dat z jízdy závodního automobilu pro team MM racing (účast v evropských formulových sériích)
- příprava vozidel pro MČR v automobilových soutěžích
- spolupráce s HCT s.r.o. (škola bezpečné jízdy) při rozboru dynamiky jízdy osobního automobilu v mezních situacích

Technicko-poradenská činnost

2003-dosud

Doktorský studijní program (kombinovaná forma)

Ústav dopravní techniky – Motorová vozidla, téma disertační práce: Analýza měření jízdní dynamiky vozidel s využitím matematického modelování

### Vysoké učení technické Brno – Fakulta strojního inženýrství

1998-2003

Ing.

Ústav dopravní techniky – Motorová vozidla

### Vysoké učení technické Brno – Fakulta strojního inženýrství

poskytla vzdělání

Období  
Dosažená kvalifikace  
Obor  
Název a typ organizace, která  
poskytla vzdělání

1994-1998  
Maturitní zkouška

**Gymnázium Jakuba Škody, Přerov**

**Schopnosti, znalosti a  
dovednosti**

Mateřský jazyk

**Český jazyk**

Další jazykové znalosti

*Sebehodnocení*

*Evropská úroveň*

**Anglický jazyk**

**Německý jazyk**

**Francouzský jazyk**

Porozumění		Mluvení	Psaní
Poslech	Čtení	Ústní projev	Písemný projev
Více pokročilý	Více pokročilý	Více pokročilý	Více pokročilý
Středně pokročilý	Středně pokročilý	Středně pokročilý	Středně pokročilý
začátečník	začátečník	začátečník	začátečník

Počítačové znalosti a dovednosti

- MS Windows, MS Office, Internet, Outlook Express (vše na velmi dobré úrovni)
- Matlab, MathCad, ProEngineer, Catia, MSC Adams, Ansys

Řidičský průkaz

B, B+E

Reference

Ing. Petr Portěš PhD.

## ABSTRACT

This doctoral thesis is focused in connection of measurement with a model in this meaning. Only relative easier measurable variables are measured on a vehicle and these variables make model inputs. This process can be improved by using dynamic filtering principles, where measured variables are used not only as model inputs, but they are used for the correction of a model motion too. We can obtain an optimal estimate of vehicle real behaviour during a manoeuvre with using this method.

Linear discrete Kalman filter (dynamic filter) was used for the connection of the measurement with the mathematic model with regard to chosen model (planar linear single track model). The main task of Kalman filter is try to estimate the state of the discrete time depending process that is determined by the linear stochastic difference equation.

Effective measurement system (based on CompactRIO unit) was built within the scope of this PhD thesis. This system is able to measure simultaneously a lot of quantities on the experimental vehicle. Velocity components (measured through optical correlative sensor Correvit), yaw velocity (measured through vibrating gyroscope), lateral acceleration, distance component (measured through MicrosatGPS system) are the basic measured parameters.

Big attention was paid to obtain other important inputs of the mathematic model such centre of gravity position, moment of inertia, steering ratio etc.

The last part of the thesis is oriented on the real connection of the measurement with the mathematic model. Formula Ford 1600 was used as the experimental car. The driving manoeuvre was arranged according to the norm ISO/WD 3888/2. Three versions of the Kalman filter were realised, which differs in the measured variables used for the mathematical model motion correction. Other possibilities, how to improve the process of state variables estimation eventually how to effective use this algorithm for vehicle parameters identification (cornering stiffness of the tires for example), are sketched in the end of the thesis.